第 42 卷 第 4 期
2024 年 11 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 42, No. 4
Nov., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.10.8

基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法

逄昱宸 1,2,3，彭子夫 1,2,3，耿涛 1,2,4，孙伟民 1,2,4，严云翔 1,2,3,4

(1. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室，哈尔滨 150001； 2. 哈尔滨工程大学 海洋光子材料与器件物理工业和信息化部重点实验室，哈尔滨 150001； 3. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展中心，青岛 266000；4. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院 先端光子学研究所，哈尔滨 150001)

摘要：光纤扰模技术用于高分辨率光谱观测可以有效提高视向速度测量精度，为搜寻类地行星等前沿科学问题提供了有利工具。当前光纤传输产生的模式噪声对高分辨率光谱仪带来的影响越发不可忽视，如何通过出射光场的模式散斑图直接分析光纤扰模效果成为了重要课题。针对此问题，构建了一种基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法，通过结合二维傅里叶频谱分析和图像对比度及可见度的计算对不同光纤的出射散斑图进行了对比分析。这种更加普适、统一、无差别化的方法为评价光纤扰模效果的准确性和有效性提供了重要的方法支持。

关 键 词：光谱仪；望远镜；成像；径向速度；图像处理

中图分类号： P111 文献标识码： A

1 引 言

在现代天文探测中，通过搜寻位于宜居带中的类地行星并研究其大气成分以搜寻地外生命是目前天体物理学研究的热门话题。作为近年来发现行星数量仅次于凌星法的方法，基于多普勒频移原理的视向速度测量法发展迅速。目前视向速度的短期（101 分钟）测量精度首次达到了 1 cm/s[1]的级别，相比于围绕类日恒星、位于宜居带内的类地行星引起的约 9 cm/s[2]的视向速度信号来说，该锁模激光器天文光梳系统的测量精度可以达到要求但无法保持一年以上的测量时间。而且如此高精度的天文光梳系统，由于其制造的复杂性目前只有德国门罗系统公司对外出售，并且该光梳用于不同的光谱仪所达到的实际测量精度也不同，于是提高光谱仪精度以提升视向速度测量精度是非常有必要的。

为了提高光谱测量的准确性以保证视向速度的测量精度，光纤被用于天文光谱仪中对望远镜收集到的光进行传输。但是在使用多模光纤传导相干光时，由于不同模式间的相互干涉，

收稿日期：2024-10-25； **修回日期：**2024-10-23

资助项目：国家自然科学基金 (12103015)

通讯作者：严云翔，yxyan@nao.cas.cn

光纤出射近场图中会出现明暗相间的激光散斑图案[3, 4]。同时我们在实验过程中还发现，在非相干的白光照射下，光纤的近场图中也会出现“类散斑图案”[5]，并同样表现出长度依赖性。光纤扰模技术可以有效抑制以上两种散斑图案的产生，以提高视向速度测量精度。由于单根圆形光纤的扰模性能有限，Chazelas[6]在 2010 年实验测试了一种多边形截面的光纤，两年之后 Spronck[7]和 Feger 等[8]也进行了多边形光纤和圆形光纤远近场的光强分布对比实验，证明了多边形光纤更为优越的扰模特性。

一般情况下我们会从光纤的近场和远场两方面综合衡量光纤的扰模效果，其中根据近场评价扰模性能的方法大概可以分为以下三种。第一种方法是近场扰模性能的经典度量：扰模增益系数 (Scrambling Gain, SG)。它的最初定义是检测器输入处的星光横向位移与光谱仪中点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 的位移之比[9]：SG=$(d/D)/(f/F)$，其中 d 是星星的位移，D 是光纤的直径，f 是 PSF 的位移，F 是 PSF 的半高全宽，示意见下图1所示。然而现实观测中的入射位移 d 是在不断变化的，所以天文学者们认为一系列连续变化的结果应该比一个数值 SG 更具有说服力，于是会同时提供质心漂移图来一起评价扰模效果[6, 10, 11]。第二种常见方法是绘制强度分布曲线，即根据过图片质心的单像素切片做出一维强度分布曲线图[12, 13]，通过分析曲线图的平滑程度和波动情况来评价扰模效果。最后一种是较为新兴的方法，结合了傅里叶功率谱的知识进行图像分析，即通过对出射近场光斑图进行二维傅里叶变换得到图片的功率谱密度，过图片中心点画出径向平均功率谱图用于分析评价扰模效果[14, 15]。

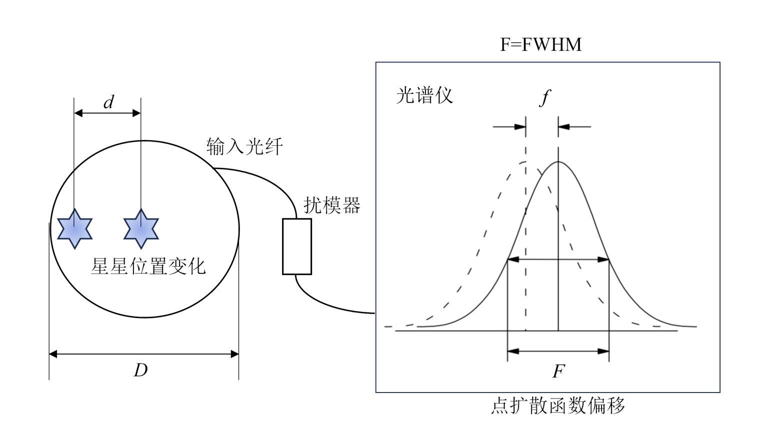


图 1 SG 计算原理图

然而，在使用上述方法验证异形光纤扰模性能的实验中，我们发现了扰模增益和质心偏移的不对称性。于是受第三种方法的启发，本文提出了一种基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法。通过对出射近场光斑图进行二维傅里叶变换后旋转平均得到归一化频谱图，分析比较不同光纤之间的频谱曲线差异性，同时计算经低通滤波处理后的图像衬比度及可见度进行量化评价。相较于之前的方法来说，本文所提出的方法对图像的处理更加统一化和综合化，可以有效避免偶然性，保证了光纤扰模效果评价的准确性和有效性。

2　实验

异形光纤扰模法[16−19]通过改变光纤纤芯形状，打乱纤芯内光线的传播路径来实现模态的重新分布从而达到扰模的效果。为了验证异形光纤的扰模提升效果，本文搭建了一套扰模测试光学系统，既可以模拟和检测入射光斑在光纤端面进入的不同位置以模拟望远镜系统的入射偏移，同时也可以对光纤出射近场的光斑图进行采集。

2.1　测试光纤

实验测试了三种形状的光纤，即圆形、方形和八边形光纤，其参数如下：

（1）圆形阶跃多模光纤（Circular-core step-index multimode fiber, 下文使用 SI 代表）的纤芯直径为 105 μm，包层直径为 125 μm，数值孔径（Numerical Aperture, NA）为 0.22，购买自南京盛略科技有限公司。

（2）方形阶跃多模光纤（Square-core step-index multimode fiber, 下文使用 SQ 代表）的纤芯尺寸为 100*100 μm，包层尺寸为 330*330 μm，NA 为 0.22，购买自南京盛略科技有限公司。

（3）八边形阶跃多模光纤（Octagonal-core step-index multimode fiber, 下文使用 OCT 代表）的纤芯直径为 200 μm，包层直径为 660 μm，NA 为 0.22，购买自德国 CeramOptec 公司。

下图为使用相同放大率的同一系统拍摄的三种光纤端面图，为方便展示我们将三张图片做了剪切调整，图中标尺分别代表不同的实际长度。

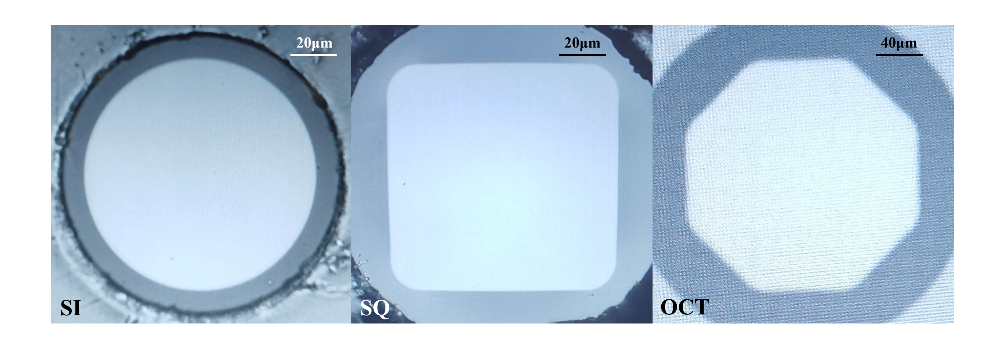


图 2　三种光纤的端面图

2.2　测试平台

为测试不同类型的光纤扰模效果而设计搭建了的扰模测试光学系统，如下图3所示。该系统可采用不同种类激光或 LED 光源作为入射源模拟星光信号，入射光斑经测量光纤端面反射后通过分束立方体进入端面观测成像系统，以实时监测入射光斑的偏移情况。近场检测装置由可调倍率远心镜头和高精度相机 (4024×3036) 组成，用来采集出射近场的光斑图像。

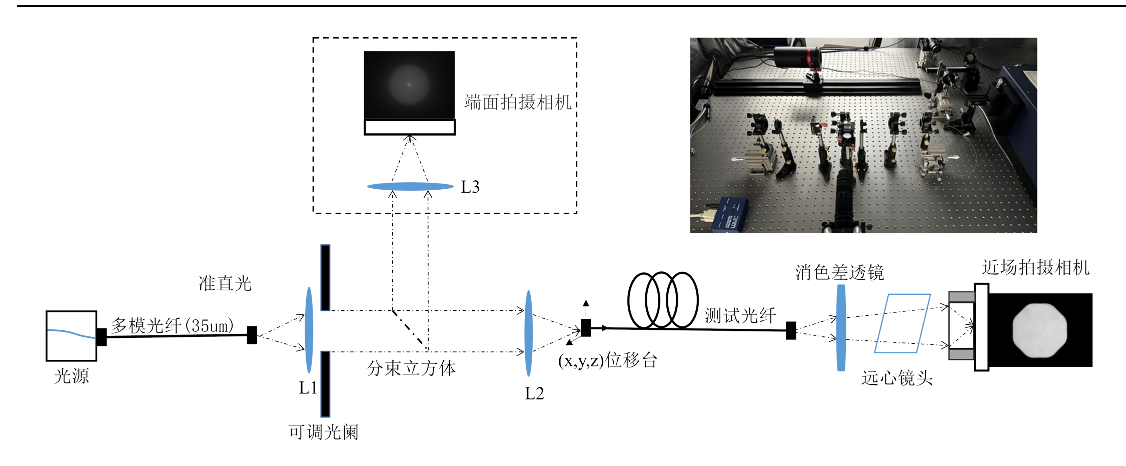


图 3 实验测试光路图

2.3 实验结果

我们采用图3所示光路系统，以及波长为 650 nm 的红色激光和非相干 LED 两种光源，分别得到了以下两种光斑图。图4为 650 nm 的激光光源下得到的出射光斑图，图5为非相干 LED 光源入射时得到的光斑图，两图仅展示了光源在中心入射时的结果。每张图中从上到下分别为圆形、方形和八边形光纤, 从左到右依次为 0.5 m、1 m、2 m、5 m 的长度。

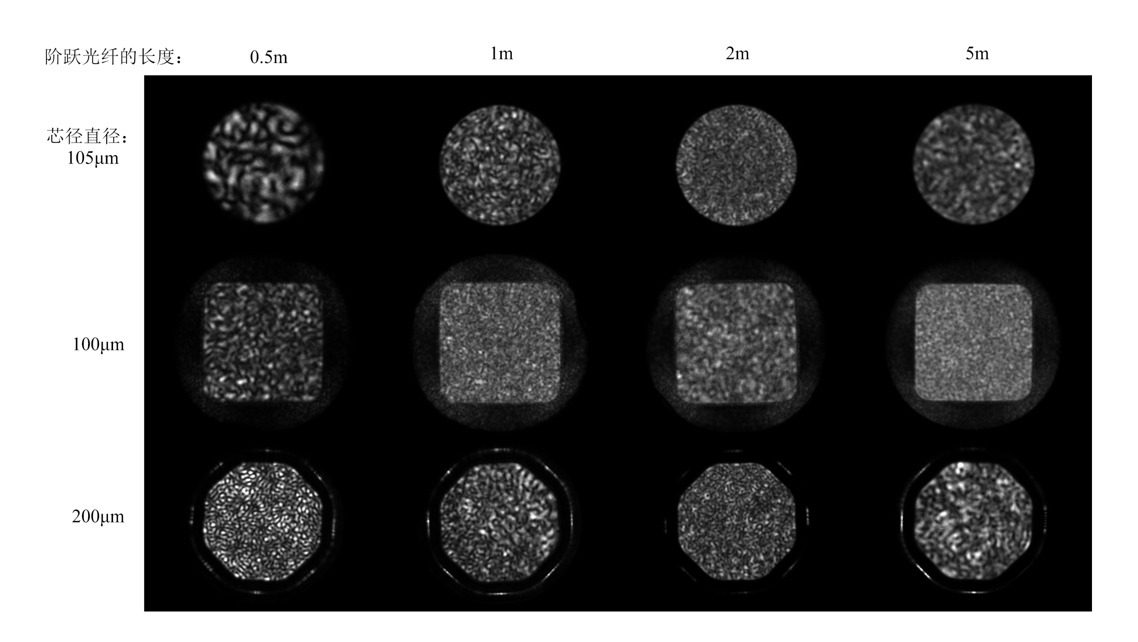


图 4 650 nm 激光入射下的三种不同长度的光纤近场图

我们在激光入射下的图4中可以看到有非常明显的激光散斑模式噪声的存在，散斑的大小和强度随光纤长度的增大有所缓解，并且多边形光纤的散斑更小也更微弱。

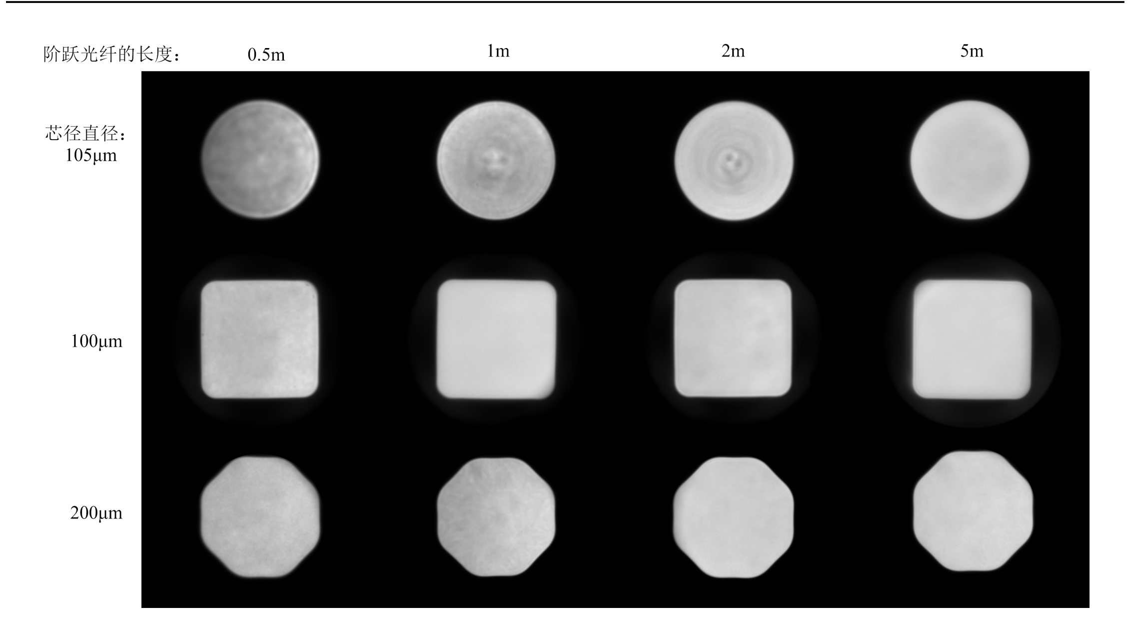


图 5　LED 光源下的三种不同长度的光纤近场图

图5是我们在非相干 LED 光源的入射下发现的新现象，由于类似激光散斑模式噪声故称之为“模式图案”[5]，可以看到这种现象也有类似的长度依赖性。至于图5中 1 m 和 2 m 的圆形光纤中心区域的特殊图案我们将其归因于光纤端面的抛光处理过程。

2.4　数据处理

2.4.1　质心偏移

为模拟星光信号的偏移，我们通过光纤入射端的五维位移台来控制入射光斑在光纤端面沿 x 和 y 轴两个方向分别移动，移动步长为光纤直径的 10%，每次移动 7 个位置（包含原点），同时采集光纤的出射近场图。由于位移台由人工调节，所以每次移动存在微小的手动误差。于是我们在每个位置连续采集 10 幅图片进行叠加以降低随机噪声，并在保持同一个人同一位置的情况下在每个方向重复移动测量 3 次以确保结果的准确性。下图6以圆形光纤为例，清楚展示了入射光斑在光纤端面的偏移情况，中间的数字表示相对入射偏移，也就是光源入射偏移量与测试光纤直径的比值。

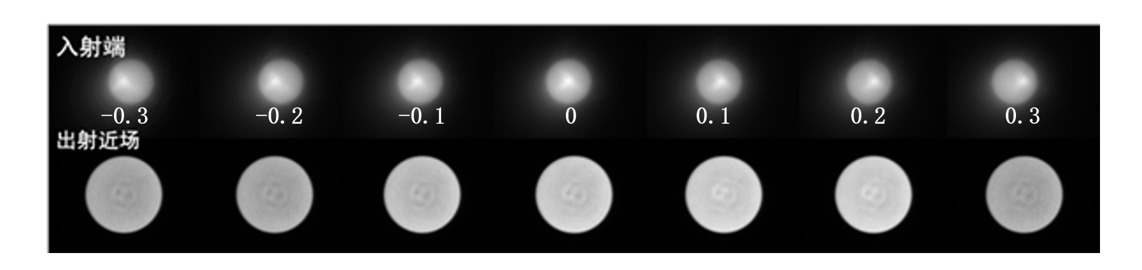


图 6　光源在圆形光纤入射端的偏移示意图以及与之对应的近场出射光斑图

首先我们使用最经典的分析方法：质心漂移图和扰模增益计算来处理实验所得的近场光斑图。结果分别如图7和图8所示，其中横坐标上方为沿 x 轴偏移所得结果，下方为沿 y 轴偏移所得结果。两图的横坐标统一为相对入射偏移，代表光源入射偏移量与测试光纤直径的比值，图7纵坐标表示光纤近场出射图的质心偏移量，图8纵坐标表示扰模增益系数 SG，误差棒为三次重复测量结果之间的误差。

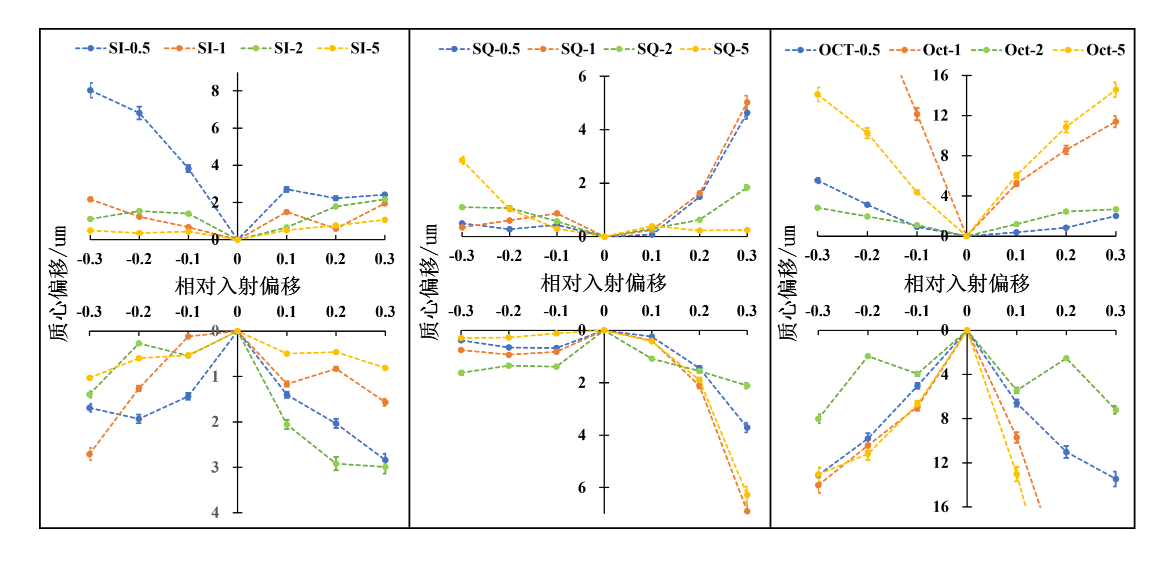


图 7 三种光纤的质心漂移图

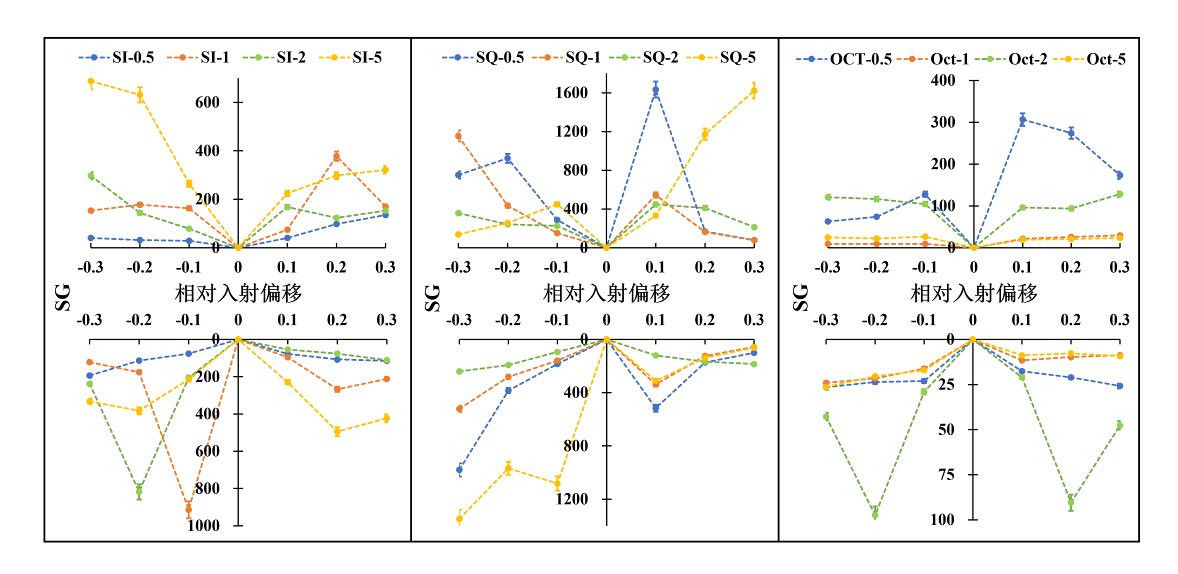


图 8 三种光纤的 SG 散点图

从折线图7中可以明显看出，出射近场的质心偏移量与相对入射偏移量并不是线性关系，也就是说 SG 相对于原点分布是不对称的，如图8所示。实际上，早在 2010 年 Avila[20] 在实

验中就发现出射图分布是不完全对称的，并在 2022 年的文章中[21]更加清楚地提出“SG 相对于原点入射情况下分布不对称”以及“近场光斑图沿入射偏移方向会有不同的改变且与光纤路径的形状有关”等等与本文类似的不对称性的发现。叶慧琪[16]也在 2020 年的文章中表示“在测量过程中发现，出射近场的质心漂移量与入射位置的偏移量并不是线性关系”。更早的发现[22]还将其归因于慧差的产生，并提出了“入射光源角度的影响大于偏移位置的影响”等结论。以上天文学者们的早先发现以及我们在实验中的再次验证都表明使用质心漂移图和扰模增益系数 SG 的经典评价方法会出现结果的不对称性以及不确定性，这对于光纤近场与光谱线成镜像关系的光谱仪来说无疑会产生影响。

在具有长期稳定性和高视向速度测量精度的高分辨率光谱仪中，光纤本身的扰模特性可以在传输的过程中将光谱仪与望远镜所处外界环境的多种变化条件（如温度、压力和望远镜位置等）进行解耦，并同时保证光谱仪输入光源的稳定性和均匀化。光纤光谱仪将传输光纤的输出端直接成像到检测器上，光纤输出的微小变化即为像平面的微小变化，从而表现为光谱线的位移或形状的变化。因此，当光源在光纤的入射端进行方向相反距离相同的对称偏移时，光纤输出端图像理论上应该产生有相似对称性的质心偏移并得到几乎相同的扰模增益系数。但我们的验证实验中却得到了并不对称的结果，这会使光谱线出现不同程度的位移和形变，导致在光谱定标时不同区域的光谱信号产生的误差程度不一，使得定标工作困难，或者导致光谱测量结果在不同次测量中难以重复，增加了测量的不稳定性等问题。

除去结果不对称的问题以外，我们从计算结果中还发现，相对于圆形光纤的质心偏移来说，多边形光纤的扰模性能似乎并没有显示出非常明显的提高，这样的计算结果与图片的直接形貌学特点也并不相符，我们猜测这也可能是由于光纤表面的不均匀性和拍摄相机灵敏度的不均匀性导致的，因此仅仅通过质心偏移和扰模增益 SG 来评价光纤的扰模效果以及因此导致的光谱仪中谱线的偏移和变形是不够全面的。

2.4.2 可见度分析

为了减少多次处理产生的误差叠加，我们希望对收集到的光斑图进行直接处理分析，于是提出了另一种扰模效果的量化方式：计算对比度和可见度。考虑到我们的研究重点集中在大面积的模式图案上，为避免端面抛光处理过程所导致的中心处特殊图案对计算结果的影响，我们在整个光斑分布的子集中计算了对比度和可见度，取样方法如图9（a）所示。右图中的 C 代表对比度，V 代表可见度。进行计算的对比度是图像灰度值数据的标准差和平均值之比，可见度是一幅图像中灰度值的最大值和最小值的差和之比，两者都可表现一幅图片的明暗差异，差异范围越小代表光斑图的亮暗对比越小，模态散斑越弱，光纤扰模效果越好。

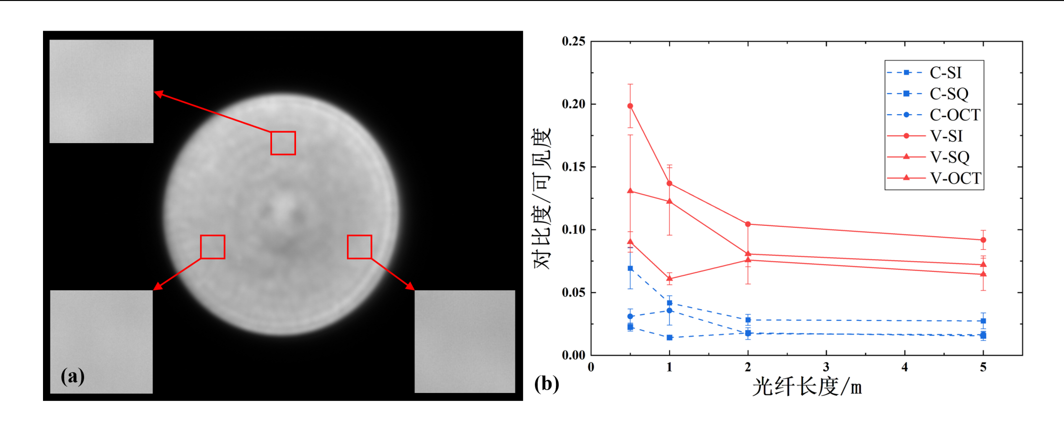


图 9 （a）光斑图子集的取样方法；（b）图5中光斑图的计算结果

图9（b）中展示了三种不同光纤的对比度和可见度的计算结果，可以看到多边形光纤的两个数值均小于圆形光纤，证明多边形光纤的模态散斑更少，扰模效果更好。并且随着光纤长度的增加，数值均有所下降，再次证明了模式图案的长度依赖性。但是，图中的误差棒在某些点处较大，说明这种人工随机取样的方法也依旧存在一定的偶然性。

3 基于傅里叶频谱的散斑分析方法

上一节中使用的两种扰模评价方法都存在较大的随机性和偶然性，我们想要找到一种更加普适的处理方法并且集中于模态变化的分析，于是我们首先结合二维图像傅里叶变换的空间频率谱线进行定性分析，再使用对比度和可见度进行定量计算。

3.1 傅里叶频谱分析

首先我们将实验图进行强度归一化处理，以保证每张图在时间域上具有相同的能量，然后进行二维傅里叶快速变换（2D Fast Fourier Transformation, 2D FFT）。变换后得到的二维频谱图将能量强度分解为来自二维不同空间频率的单独贡献[23]，其中明暗不一的亮点表示原图中某一点与相邻点灰度值差异的强弱，即灰度值梯度的大小，也就是该点频率的大小。为了将不同光纤的频谱图差异更为清晰直观地表现出来，接下来我们将二维空间频率图像旋转平均以在一维空间频率图上得到归一化频率。我们使用双线性插值的方法，将每张频谱图进行 1 度旋转，一共旋转 179 次（频谱图为轴对称，所以只需旋转 180 度即可覆盖所有空间频率），再将这 180 张图片进行叠加后，取任一方向的数据绘制成一维频谱图。

图10（a）以 0.5 m 长的三种光纤实验图为例，从上到下依次显示为强度归一化图片、傅里叶频谱图（已做中心化处理）、旋转平均二维频谱图。（b）是四个长度下三种光纤的一维频谱图。其中 y 轴是归一化频率，x 轴是一维空间频率，实验中用于采集近场图像的高精度相机的像素为 1.85 μm，因此空间频率简单地以 μm^{-1} 给出，并且绘制到奈奎斯特频率（1 周期/2 像素 = 270 μm^{-1}）截止。

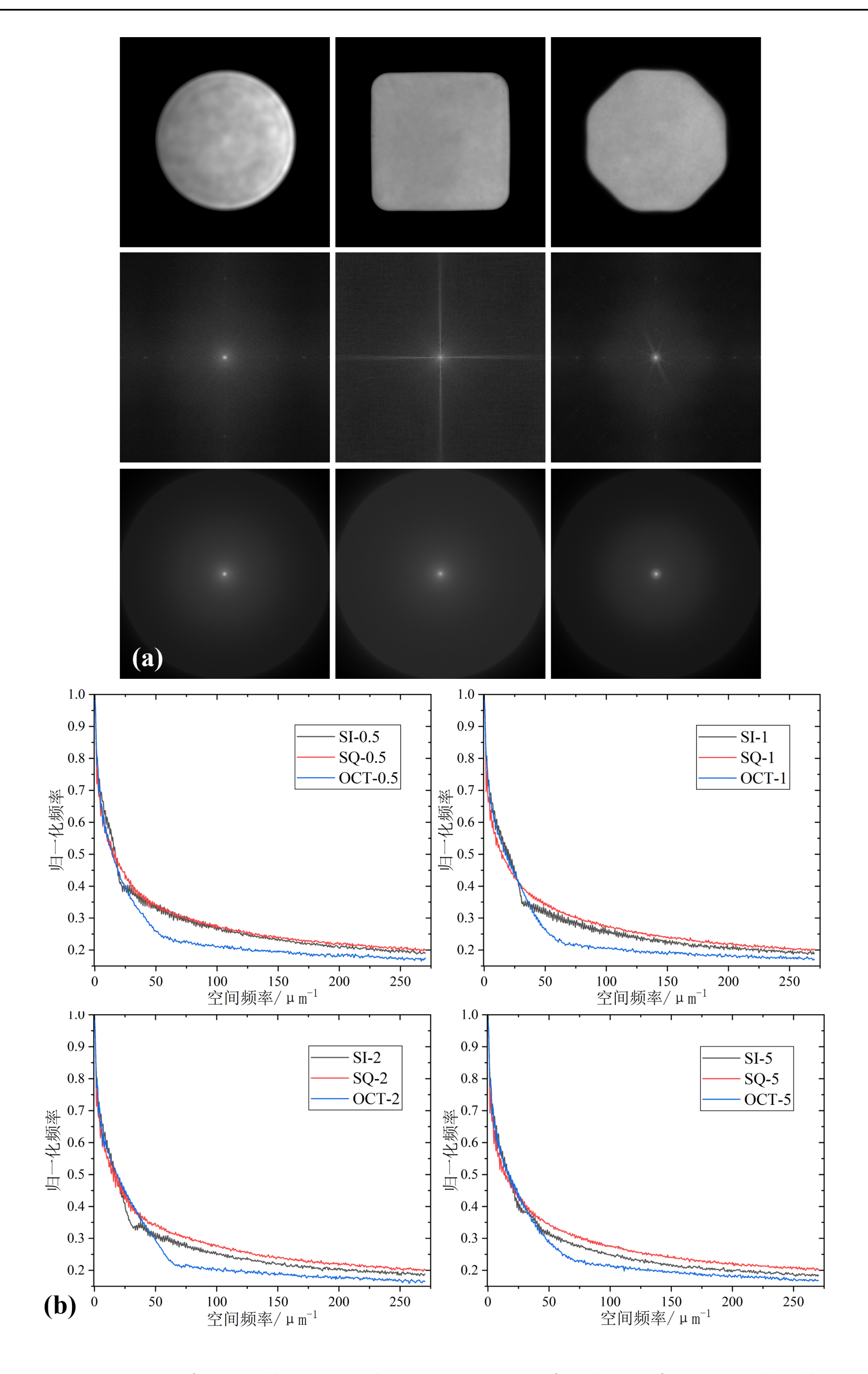


图 10　（a）三种光纤图像的处理过程图示例；（b）四种长度下三种光纤的一维频谱图

在傅里叶频谱图中，高频成分表征图片灰度值变化剧烈的区域，高频成分对应的强度表征散斑的强度。相反的，低频成分即为灰度值缓慢变化的区域，占比越大也就代表模式图案越少，光纤扰模效果越好。四种长度下各光纤的不同频率强度占比的计算结果整理在图11中，左侧 y 轴为傅里叶频谱旋转平均后的一维归一化频率，右侧 y 轴为各空间频率的强度占比。

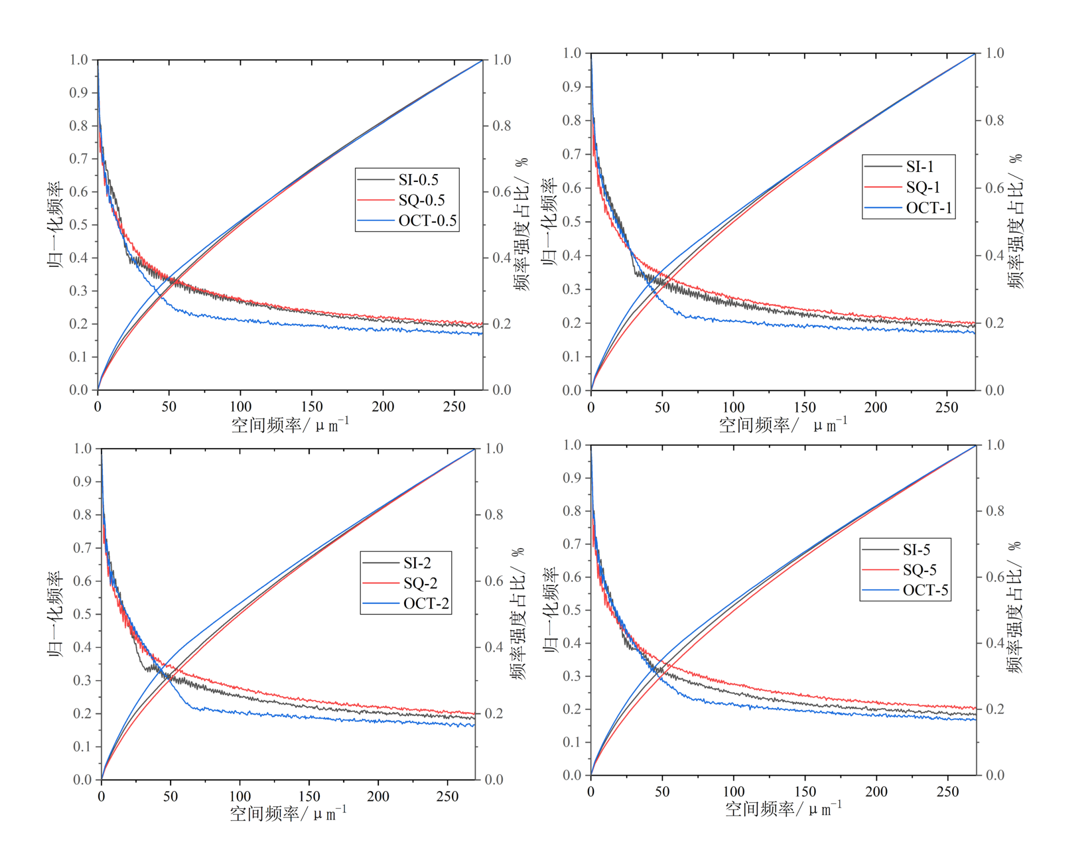


图 11　长度分别为 0.5、1、2、5 m 的三种光纤的归一化频率谱及各空间频率对应下的强度占比

从图12中可以看到在空间频率小于 10 μm^{-1} 的区域内各曲线基本重合，表明不同种类和长度的光斑尺寸基本稳定。八边形光纤的低频成分占比明显大于其他两种光纤，更多的功率强度分布在更低的空间频率上，说明八边形光纤散斑花样较少，具有优越的扰模性能。至于曲线后方趋于平缓的部分，我们可以将其看作高频噪声，三种光纤噪声频率的差异我们猜测是由于曝光时间的微小差异导致的。

接下来我们使用相同的图像处理方法，对 2.4.1 中入射偏移后得到的实验图进行了处理。下图12中以长度为 5 m 的处理结果图为例，从上到下分别为圆形光纤（SI）、方形光纤（SQ）和八边形光纤（OCT）。每张图中的左侧 y 轴表示二维傅里叶频谱旋转平均后的归一化频率，右侧 y 轴表示各空间频率的强度占比。左侧三幅图为入射光斑沿 x 轴偏移所得，右侧三幅图为沿 y 轴入射偏移所得，图例中的百分数代表入射偏移距离占测试光纤直径的比值。

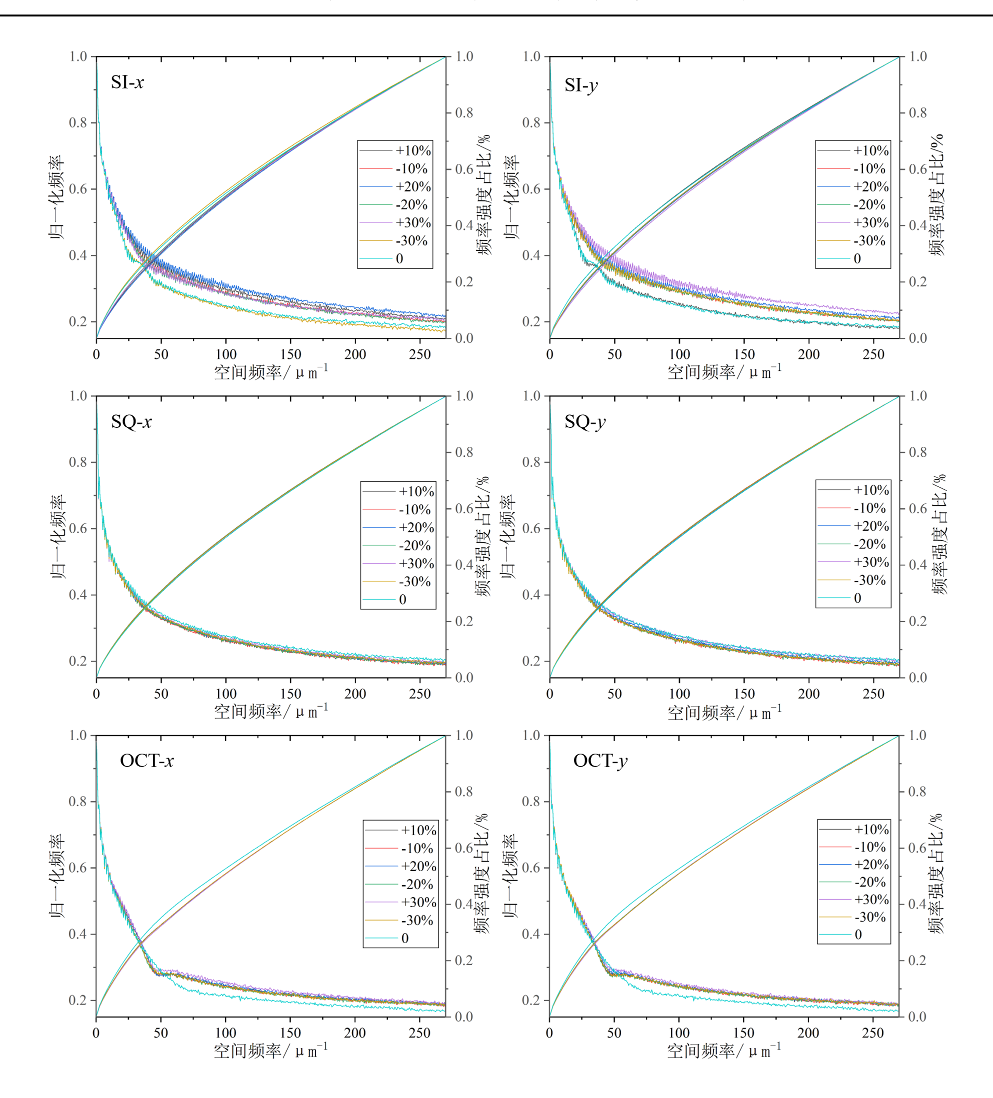


图 12　入射偏移下三种光纤的归一化频率谱及各空间频率对应下的强度占比

从图中可以看到偏移入射曲线与中心入射曲线是不完全重合的，为了更准确地比较各光纤之间的曲线弥散度差异，我们计算了曲线之间的均方根（Root Mean Square, RMS）。将图12中每种光纤每个偏移方向的曲线与中心曲线做均方根计算，各偏移方向的均方根平均值如下表 1 所示，其中 RMS 与归一化频率一样为无量纲数值。

表 1　三种光纤入射偏移曲线与中心曲线的 RMS 均值

RMS	SI	SQ	OCT
x 方向偏移	0.0439	0.0125	0.0275
y 方向偏移	0.0499	0.0129	0.0256

表格中的数据非常清晰地表明圆形光纤的两曲线差异更大，即入射偏移对圆形光纤的傅

里叶频谱曲线影响更大，而多边形光纤则可以保持较为稳定的状态，再次验证了其优于圆形光纤的扰模特性。

3.2 对比度和可见度

以上频谱图对扰模效果的定性分析是很有帮助的，但由于傅里叶频谱图更适用于散斑数目较多、强度起伏较大的场[23]，而我们实验中使用的 LED 光源入射所得的“模式图案”相对较少，导致三种光纤的曲线区别较小，于是接下来加入对比度和可见度的计算来进行量化分析。在此之前，考虑到图5中某些光纤中心区域由于抛光过程产生的特殊图案，我们需要找到一种图像处理的办法将该图案去除或减弱，这样就无需避开中心图案人工提取子集区域进行分析，直接计算整个纤芯部分即可，避免了 2.4.2 中三次取样的随机性。

为了滤除光纤中心处的高频特殊图案，我们在三种低通滤波器中，选择了介于滤波尖锐的理想低通滤波器和滤波平滑的高斯低通滤波器之间的巴特沃斯低通滤波器[24]。该滤波器的实现有两个可调变量，截止频率 D_0 和阶数 n[25]，对应于二维图像来说，D_0 是某频域点到中心点的距离，n 越大则滤波器的形状越陡峭即振铃现象越明显。我们将相同长度下三种光纤强度占比差值最大处的频率作为低通滤波器的截止频率 D_0，然后将我们的傅里叶频谱曲线与巴特沃斯低通滤波器不同阶数的函数曲线进行了比对，发现可取阶数为 1-5。于是我们以 0.2 为间隔使用了不同阶数的低通滤波器对实验图进行重复处理，最终得到当 n=2.2 时的滤波器可以保证图片依旧清晰的同时滤波效果最好。接下来使用该巴特沃斯低通滤波器对所有中心入射的实验图进行了滤波处理，计算出的各种光纤的对比度和可见度结果如下图所示。图13（a）代表滤波之前在光斑图中心处取一 1000*1000 像素大小的区域进行计算后得到的对比度和可见度数值，（b）代表滤波之后光斑图的对比度和可见度数值，（c）表示滤波处理对两数据的优化程度。图例中的 C 代表对比度，V 代表可见度。

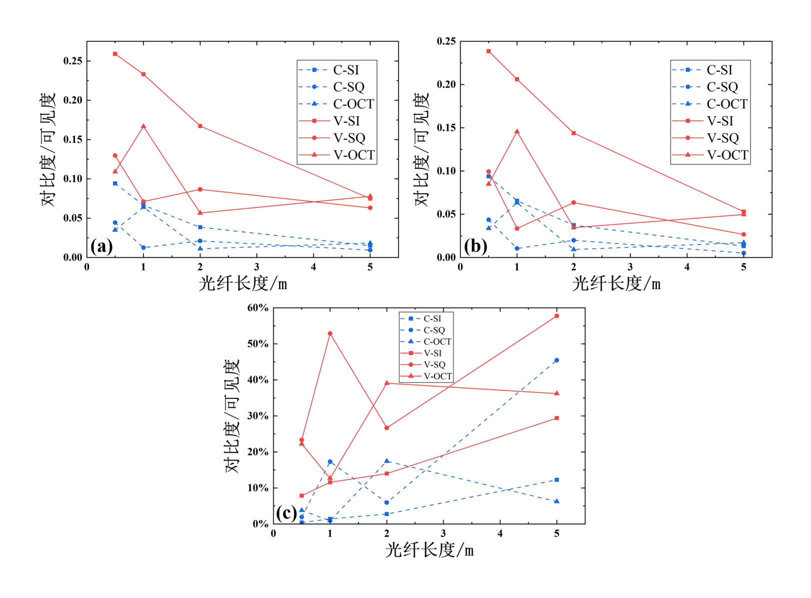


图 13 滤波前后光斑图的对比度和可见度数值

非常明显的，多边形光纤的对比度和可见度均小于圆形光纤，长光纤的对比度和可见度均小于短光纤，并且滤波处理对多边形光纤的提升是最有效果的，各方结果均可证明：多边形光纤的扰模性能明显优于圆形光纤。接下来使用同样的方法对 2.4.1 中入射偏移实验的结果图进行计算，下图14为对比度统计图，图15为可见度统计图，其中横坐标上方为入射光斑沿 x 轴偏移所得结果，横坐标下方为沿 y 轴偏移所得结果。两图的横坐标统一为相对入射偏移，代表光源入射偏移量与测试光纤直径的比值。两图的纵坐标也均为无量纲比值。

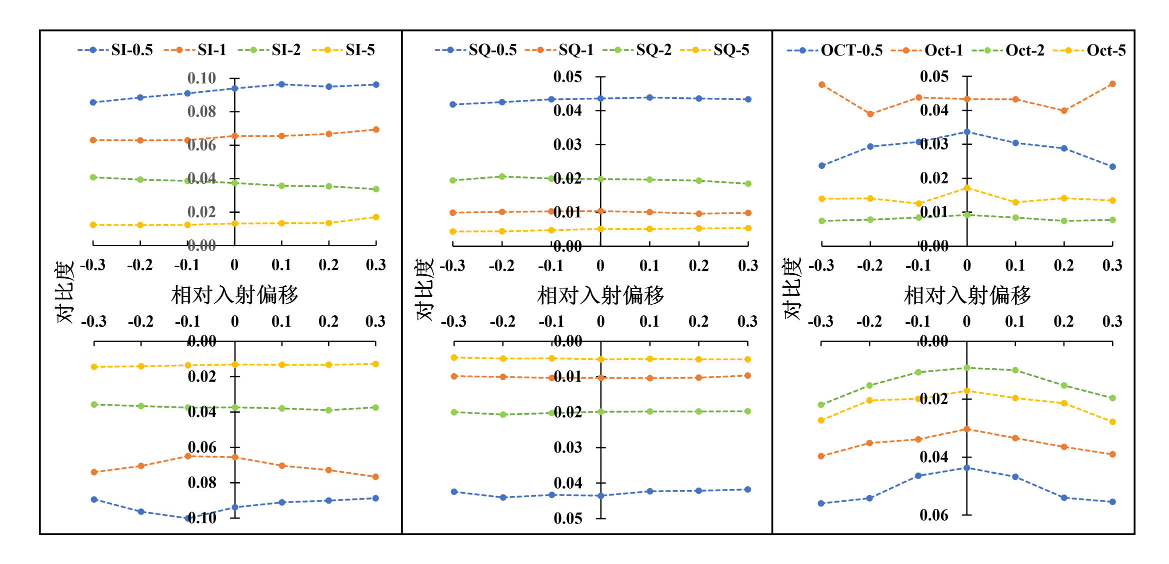


图 14　四种长度的三种光纤在不同偏移下的对比度统计图

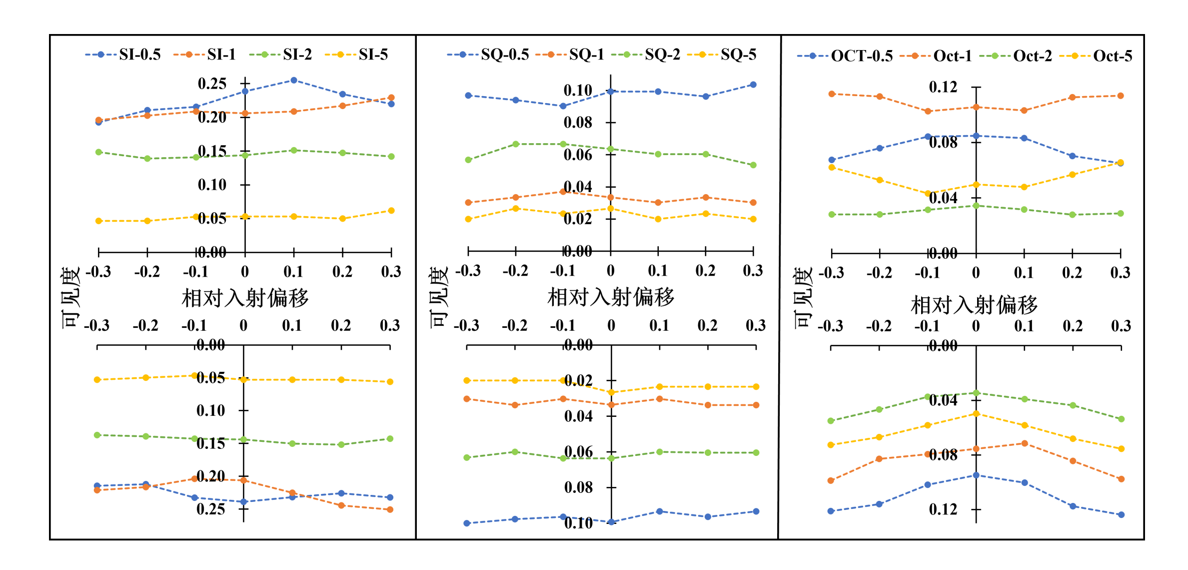


图 15　四种长度的三种光纤在不同偏移下的可见度统计图

综合两图结果来看，右侧两图多边形光纤的对比度和可见度的整体数值明显小于圆形光

纤，多边形光纤的不同长度之间数值差异更小，从而再次印证了多边形光纤扰模性能更好这一结论。此外，两图像的数据分布相比于之前的质心漂移图7和扰模增益图8来说，肉眼可观地具有更好的对称性，与我们的实验偏移结果更为贴切，也更具说服力。

以上对实验图的处理分析，无论是傅里叶频谱图的定性分析结果，还是对比度和可见度的定量计算结果，都可以较为准确地体现出实际的光场变化和扰模效果差异，使扰模效果的评价更为准确和合理，验证了本文方法的可行性。此外需要注意的是，该方法作为 St*ü*rmer 在文章中[10]提到的“与视向速度误差并没有直接关系、仅对不同光纤或扰模方式之间的比较起作用的近场测量方法”，它仅可用于不同光纤或扰模方式之间的扰模性能的比较，并不可代替质心偏移和扰模增益系数 SG 与视向速度误差产生直接联系，也无法直接提高视向速度测量的精度。我们对其的应用构想为在处理光谱数据之前，辅助质心偏移的计算，淘汰掉一些由于外界影响（例如光纤表面均匀性、光学元件的照明依赖性、探测器灵敏度等）产生光谱线失真和偏移的图片，挑选出最适合用于光谱分析以及光谱定标的图片。这些图片既可保证稳定的质心偏移和较高的扰模增益系数，也可以保证较低的对比度和可见度，同时还具备较好的对称性和均匀性。这种在大量数据处理前进行的筛选，可以减少处理外界影响导致的光谱异常情况，保证被处理数据的质量和处理结果的可靠性，有效提高工作人员的光谱处理效率。

4 总结

光纤扰模是提升视向速度测量精度的重要技术手段。基于 SG 单性能指标评价中的不对称性和不确定性问题，本文提出了基于傅里叶频谱，并结合对比度和可见度分析的光纤扰模性能综合评价方法。该方法综合了光纤近场质心偏移的 SG 测量、频谱分析、近场对称性和均匀性等特征对光纤扰模性能进行综合分析评价，弥补了 SG 测量作为单性能指标评价的稳定性不足，可以有效避免光纤近场扰模分析中的人为选择偶然性误差，降低了外界环境对扰模性能评价产生的干扰，实现更加普适、统一、无差别化的扰模性能综合评价，提升不同扰模方法之间的综合扰模性能对比优劣的可靠性，为用于高分辨率光谱分析的高性能光纤扰模技术研发提供支撑。

参考文献：

[1] Probst R A, Milakovi*ć* D, Toledo-Padr*ó*n B, et al. NatAs, 2020, 4(6): 603-608
[2] Wilken T, Lovis C, Manescau A, et al. MNRAS: Letters, 2010, 405(1): L16-L20
[3] Frensch, Jolanda, Bouchy, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Canada: SPIE, 2022, 12184: 1634-1640
[4] 朱玉晗，贺锋涛，彭小龙. 激光技术, 2016, 40(01): 122-125
[5] Ma Z, Pang Y, Sun K, et al. Optoelectronic Devices and Integration XII. China: SPIE, 2023, 12764: 45-52

[6] Chazelas B, Pepe F, Wildi F, et al. Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation. United States: SPIE, 2010, 7739: 1458-1466
[7] Spronck J F P, Kaplan Z A, Fischer D A, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1210-1219
[8] Feger T, Brucalassi A, Grupp F U, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1278-1291
[9] Avila G, Singh P. Advanced optical and mechanical technologies in telescopes and instrumentation. France: SPIE, 2008, 7018: 1636-1642
[10] Stürmer J, Stahl O, Schwab C, et al. Advances in optical and mechanical technologies for telescopes and instrumentation. Canada: SPIE, 2014, 9151: 1717-1728
[11] 韩建, 肖东. 光学学报, 2016, 36(04): 81-87
[12] Avila G. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1437-1443
[13] Osterman SN, Ycas GG, Donaldson C, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. Canada: SPIE, 2014, 9147: 1741-1746
[14] Sirk MM, Wishnow EH, Weisfeiler M, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII. United States: SPIE, 2018, 10702: 1948-1966
[15] 王嘉琦, 许良, 常亮. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20210763
[16] 叶慧琪, 黄凯, 肖东等. 光学学报, 2020, 40(6): 0606001
[17] Han J, Xiao D. AcOpS, 2016, 36: 0406003-1
[18] 韩建, 肖东, 叶慧琪等. AcOpS, 2016, 36(11): 1106002-1
[19] Bouchy F, Díaz RF, Hébrard G, et al. A&AC, 2013, 549: A49
[20] Avila G, Singh P, Chazelas B. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. United States: SPIE, 2010, 7735: 2948-2956
[21] Avila G, Raskin G, Schwab C, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Canada: SPIE, 2022, 12184: 1471-1493
[22] Hunter T R, Ramsey L W. PASP, 1992, 104: 1244-1251
[23] Hernandez E, Roth MM, Petermann K, et al. JOSA B, 2021, 38(7): A36-A50
[24] Butterworth S. Wireless Engineer, 1930, 7(6): 536-541
[25] Shouran M, Elgamli E. IJIRSET, 2020, 9(9): 7975-7983

Scrambling Performance Evaluation Method Based on Fourier Spectrum

PANG Yu-chen[1,2,3], PENG Zi-fu [1,2,3], GENG Tao[1,2,4], SUN Wei-min [1,2,4], YAN Yun-xiang[1,2,3,4]

(1. Key Lab of In-fibre Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Photonic Materials and Devices Physics for Oceanic Applications, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China; 4. Advanced Photonics Institute, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The application of optical fiber scrambling technology in high-resolution spec-

tral observation can effectively improve the accuracy of radial velocity measurement, and provide a favorable tool for cutting-edge scientific problems such as searching for terrestrial planets. At present, the influence of mode noise generated by optical fiber transmission on high-resolution spectrometers is becoming more and more important, and how to directly analyze the scrambling effect of optical fiber through the output speckle field has become an important topic. In order to solve this problem, a scrambling performance evaluation method based on Fourier spectrum is constructed, and the output speckle field of different fibers are compared and analyzed by combining 2D Fourier spectrum analysis and calculation of image contrast and visibility. This more universal, unified and non-differentiated method provides an important method support for evaluating the accuracy and effectiveness of optical fiber scrambling effect.

Key words: spectrographs; telescopes; imaging; radial velocities; image processing